

I-40

重錘衝撃を受ける敷砂材のラーメ定数の推定

専修大学北海道短期大学	正員	三上敬司
開発局開発土木研究所	正員	中野 修
室蘭工業大学	正員	岸 徳光
室蘭工業大学	正員	松岡健一

1. まえがき

落石覆工上には、落石衝撃力を緩和するために緩衝材として砂等が多く用いられている。砂の緩衝効果に関する実験は多くの研究機関によって行われている。最初に鋼材倶楽部¹⁾によって比較的乾燥した砂を用いて実験が行われ、実験式が提案されている。その後、金沢大学では、当時多く用いられた山砂を主とした実験から重錘の衝撃力の実験式²⁾を提案している。また、落石の質量、形状などを変化させて重錘の衝撃加速度と落石覆工構造物に及ぼす衝撃土圧を測定して実験結果^{3),4)}を振動便覧式および前記の実験式と比較検討している。北海道開発局開発土木研究所^{5)~7)}では海砂を用いた砂の緩衝性能を検討するために、重錘の衝撃力と落石覆工に直接作用する伝達衝撃力を測定して実験結果と振動便覧式および吉田等の式と比較検討している。

落石覆工構造物の合理的な設計法を確立するためには、覆工上に直接的に作用する伝達衝撃力を評価することが肝要である。この伝達衝撃力を覆工の断面設計に用いるためには、振動便覧式の利用が簡便さからも得策であろう。文献⁵⁾では、2、3の例を挙げて敷砂厚90cmの場合にラーメ定数を 1000tf/m^2 とする振動便覧式の利用を提案している。そこで、本研究では、重錘重量、敷砂厚、落下速度を変化させた場合のラーメ定数について著者らが行った40ケースの実験結果を基に評価検討を行うこととする。

2. 実験概要

2.1. 実験内容

図-1 に実験風景を示している。重錘落下衝撃実験は $6.8\text{m} \times 6.8\text{m} \times 1\text{m}$ のコンクリート基礎上に、 $4\text{m} \times 4\text{m}$ の敷砂緩衝工を設置しその中央部に底部形状が球（直径100cm、高さ17.5cm）で重量 $W=2\text{tf}$ と 3tf の重錘を所定の高さまでクレーンで引き上げ自由落下させることによって行っている。

測定項目は、重錘加速度およびコンクリート基礎上に設置したロードセルから得られる伝達衝撃力、重錘落下後における重錘の敷砂への最終貫入量である。

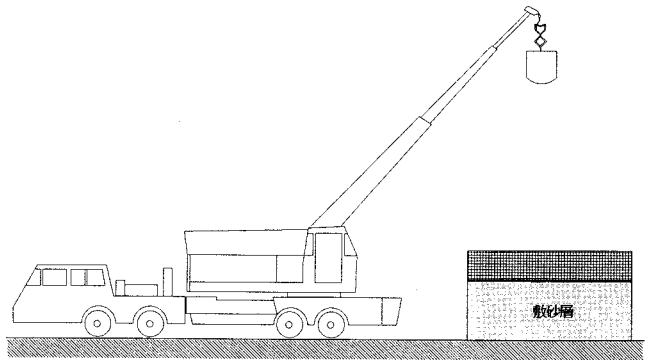


図-1 実験風景

本実験で用いた敷砂緩衝材は、比重 2.53、吸水率 2.45% の石狩当別産で、粒度試験結果は表-1に示すとおりである。敷砂は、各実験ごとに 20cm ごとの踏み固めによって転圧して所定の高さに整地している。また、層厚 30cm ごとにサンプリングして砂層の平均湿潤密度、含水比を測定している。この測定結果を表-2に示している。

実験は、表-3に示しているように重量 $W=2\text{tf}$ と 3tf の各重錘について、敷砂材の敷厚 $h=60, 90, 120\text{cm}$ に対して、落下高さを $H=5 \sim 30\text{m}$ の間で変化させた合計 40 ケースについて行っている。ただし、 t は立ち上がりの時間差、

An Evaluation of Lame's Constant of Sand Cushion under Falling Weight

by Takashi MIKAMI, Osamu NAKANO, Norimitu KISHI and Ken-ichi G. MATSUOKA

δ は重錘貫入量、 C は波動の立ち上がり時間差と敷砂を用いて評価した敷砂中を伝播する波動速度、 λ はラーメ定数である。伝播速度とラーメ定数における添え字 1、2 はいずれも貫入量を無視した場合と貫入力を考慮した場合である。

2.2. 重錘加速度計およびロードセル

本実験では、重錘衝撃力の算定評価のために、重錘中心底部に応答周波数範囲が 2KHz 以上の歪ゲージ型加速度計を、2tf の重錘には容量100Gを2個、200G、500Gを1個ずつ、また 3tf の重錘には容量200G、500Gを2個ずつ取り付けている。また、基礎上への伝達衝撃力を算定するためにコンクリート基礎上にコンクリート表面と面一になるようにロードセルを設置している。ここで採用したロードセルは受圧部直径 25mm、容量300kgf/cm²、周波数帯域が DC~1.5KHz の衝撃荷重測定用ロードセルで、基礎上に一列に中心部での最小間隔を10cmとし合計25個設置している。ロードセルの配置は、図-2に示す。

2.3. 計測システム

実験に用いられた計測システムのフローチャートを図-3 に示す。本実験におけるセンサーは、重錘に取り付けている歪ゲージ型加速度計およびコンクリート基礎上のロードセルである。各センサーからの出力波形は、応答周波数範囲がDC ~ 50KHzのシングルコンディショナを介し、DC ~ 40KHz帯域まで記録可能なデータレコーダに一括収録している。各波形の再生は、重錘加速度の 1 波形を共通トリガーとして用いて時間軸を固定し、サンプリングタイム 100μsec/word で A/D変換の後、ワークステーションを用いて各種のデータ処理を行っている。

3. 実験結果

3.1. 重錘衝撃力波形と伝達衝撃力波形の比較

ここでは重錘衝撃力と伝達応力を総和して得られる伝達衝撃力の経時変化についての検討を行う。伝達衝撃力は、伝達応力が落下点を中心として軸対称に分布するものと仮定し、台形則を用いてその応力を積分し評価することとした。

表-1 敷砂材の粒土試験結果

10%粒径 D ₁₀ (mm)	30%粒径 D ₃₀ (mm)	60%粒径 D ₆₀ (mm)	均等係数 U _c	曲率係数 U _{c'}
0.28	0.60	1.15	4.11	1.12

表-2 敷砂層の平均湿潤密度および含水比

敷砂圧	60	90	120
平均湿潤密度 (t/m ³)	1.62	1.54	1.61
平均含水比 (%)	10.05	8.88	11.31

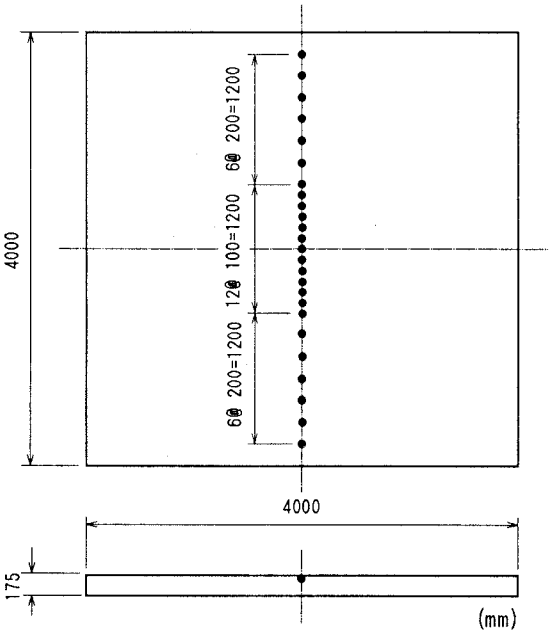


図-2 ロードセルの配置

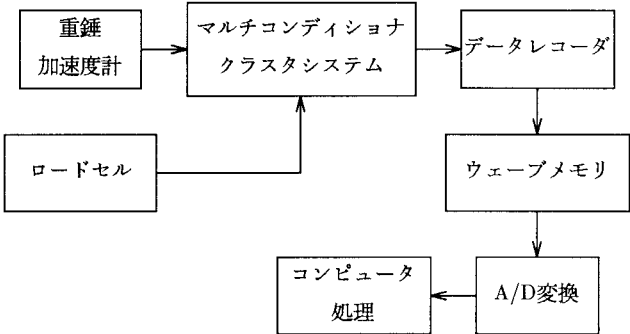


図-3 計測システムのフローチャート

表-3 実験結果、敷砂の波動伝播速度およびラーメ定数

実験 ケース No.	h (cm)	H (m)	W (tf)	t (msec)	δ (cm)	C_1 (m/sec)	C_2 (m/sec)	λ_1 (tf/m ²)	λ_2 (tf/m ²)
1-1-1	60	5	3	4.8	35.0	125	52	7920	1370
1-1-1R	60	5	3	5.6	27.0	107	59	5820	1760
1-1-2	60	10	3	5.4	34.0	111	32	6260	1170
1-1-3	60	15	3	4.4	37.0	136	52	9420	1380
1-1-4	60	20	3	5.4	42.5	111	32	6260	530
1-1-4R	60	20	3	7.2	44.0	83	22	3520	2500
1-1-5	60	30	3	5.6	49.0	107	20	5820	1960
2-2	90	10	3	9.0	56.0	100	38	5070	720
2-3	90	20	3	7.2	57.0	130	48	8620	1160
2-4	90	30	3	9.1	57.0	125	46	7920	1060
2-2R	90	10	3	9.4	44.0	99	51	4960	1300
2-3R	90	20	3	9.4	46.5	96	46	4640	1090
2-4R	90	30	3	7.6	49.0	118	54	7110	1470
4-1-1	90	5	3	1.8	35.0	500	306	-	-
4-1-2	90	10	3	9.2	38.0	98	57	4850	1620
4-1-3	90	15	3	9.6	44.5	94	47	4450	1140
4-1-4	90	20	3	10.0	52.5	90	38	4100	710
4-1-5	90	30	3	10.0	61.0	90	29	4100	430
2-1-1	120	5	3	11.6	37.0	103	72	5420	2600
2-1-2	120	10	3	10.4	45.0	115	72	6750	2640
2-1-3	120	15	3	10.2	52.5	118	66	7010	2220
2-1-4	120	20	3	9.0	56.0	133	71	9010	2560
2-1-5	120	30	3	7.4	68.0	162	70	13320	2500
1-2-1	60	5	2	6.2	26.0	97	55	4750	1520
1-2-2	60	10	2	6.2	28.0	97	52	4750	1350
1-2-3	60	15	2	6.0	33.5	100	44	5070	990
1-2-4	60	20	2	6.2	32.5	97	44	4750	1000
1-2-5	60	30	2	5.3	42.0	113	34	6500	580
4-2-1	90	5	2	7.8	28.5	115	79	6750	3150
4-2-1R	90	5	2	8.2	26.5	110	77	6100	3040
4-2-2	90	10	2	8.0	33.0	112	71	6410	2620
4-2-3	90	15	2	6.6	36.0	136	82	9420	3390
4-2-4	90	20	2	8.4	39.0	107	61	5820	1870
4-2-5	90	30	2	7.8	46.0	115	56	6750	1610
2-1	90	30	2	6.8	44.0	132	68	8880	2320
2-2-1	120	5	2	12.0	38.0	100	68	5070	2370
2-2-2	120	10	2	13.0	47.5	92	56	4320	1580
2-2-3	120	15	2	9.6	45.0	125	78	7920	3090
2-2-4	120	20	2	10.2	51.5	118	67	7010	2290
2-2-5	120	30	2	9.4	54.0	128	70	8260	2500

ただし、表中の t は立ち上がりの時間差、 δ は重錘貫入量、 C_1 は貫入量を見捨てて評価した場合の伝播速度、 C_2 は貫入量を考慮して評価した場合の伝播速度、 λ_1 は貫入量を見捨てて評価した場合のラーメ定数、 λ_2 は貫入力を考慮して評価した場合のラーメ定数である。また実験ケース No.のRは再実験を意味している。

図-4(a)~(c)は、重錘重量 $W=3\text{tf}$ 、落下高さ $H=10\text{m}$ 、敷厚がそれぞれ60、90、120cmの場合の重錘衝撃波形（実線）と伝達衝撃波形（点線）とを比較して示している。各波動分布状況は、いずれの場合も重錘衝撃力波形の方が伝達衝撃力波形より早く立ち上がっており、その差は敷厚の増大とともに大きくなる傾向にある。このことは、衝撃波がある特定の速度で敷砂中を伝播していることを意味している。

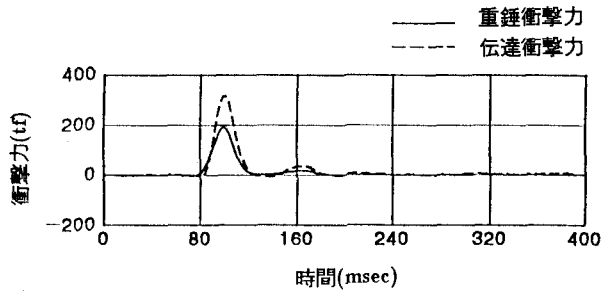
その後は、両波形ともほぼ同時点で最大値を示し、同様な減衰傾向を示して零レベルに減衰しているようである。主波動の継続時間は、敷厚 $h=60\text{cm}$ の場合の僅かな第2波動と $h\geq 90\text{cm}$ の波動端部の極く低い振幅の部分を除くと30~40msecとなっているようである。各ケースにおける両者の振幅を比較するといずれも伝達衝撃力の方が重錘衝撃

力より1.6倍以上大きいことがわかる。
 このことは、重錘落下部の敷砂が一端
 固定の一次元波動状態によく似た現象
 となっているためと思われる。

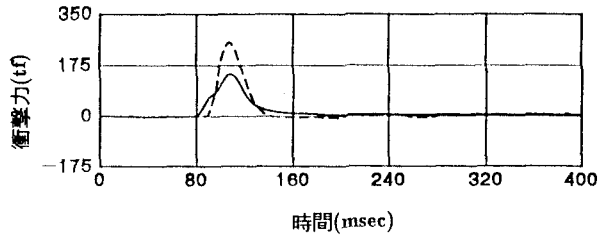
3.2. ラーメ定数と衝突速度との関係

重錘衝突によって載荷点部の敷砂の
 挙動は締め固まりや側方流動等を示す
 ことにより、この物性値が位置的にも
 また時間的にも変化するため波動伝播
 速度も時々刻々変化するものと考えら
 れる。

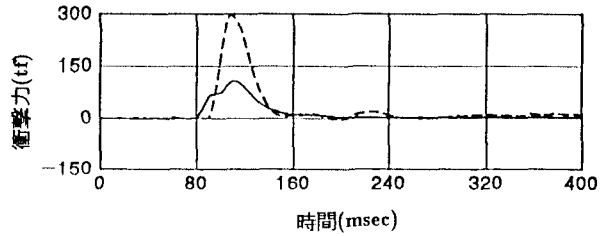
文献 5) では、波動が一定速度で伝
 播するものと仮定して、波動の立ち上
 がりの時間差より敷砂中の波動伝播速
 度を求めている。ここで得られたケー
 ス 40の実験データに対して敷砂厚か
 ら重錘落下後の貫入量を考慮した砂層
 厚と無視した砂層厚の2種類の伝播距
 離に対し、同様な考え方より波動伝播
 速度を求めた結果を前掲の表-3 に示
 している。ただし、重錘の貫入量は、
 重錘落下後の貫入量を4箇所測定して
 平均して求めたものであり、伝播速度
 およびラーメ定数は、敷砂の密度を
 $\gamma=1.6\text{t/m}^3$ 、ポアソン比 $\nu=0.45$ と仮
 定して弾性理論から算定した。表より



(a) 敷砂厚 $h=60\text{cm}$

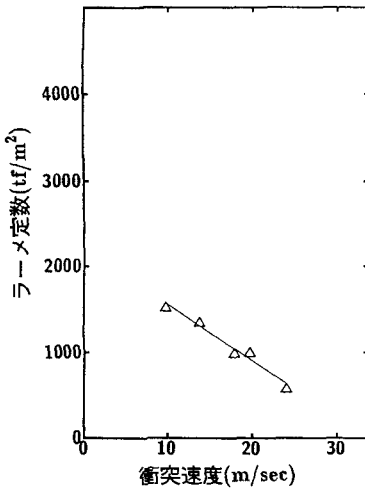


(b) 敷砂厚 $h=90\text{cm}$

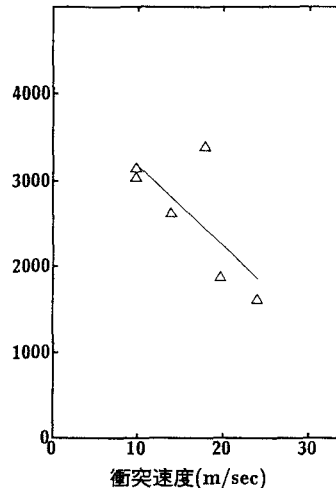


(c) 敷砂厚 $h=120\text{cm}$

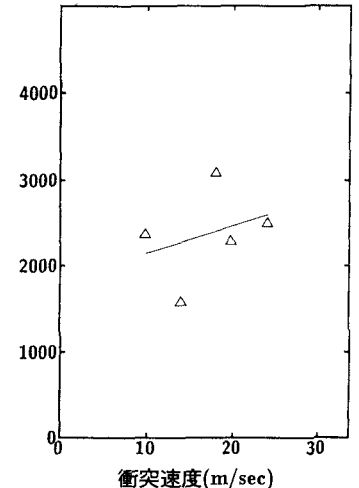
図-4 重錘衝撃波形および伝達衝撃波形



(a) 敷砂厚 $h=60\text{cm}$



(b) 敷砂厚 $h=90\text{cm}$



(c) 敷砂厚 $h=120\text{cm}$

図-5 衝突速度とラーメ定数との関係 (重錘重量 $W=2\text{tf}$)

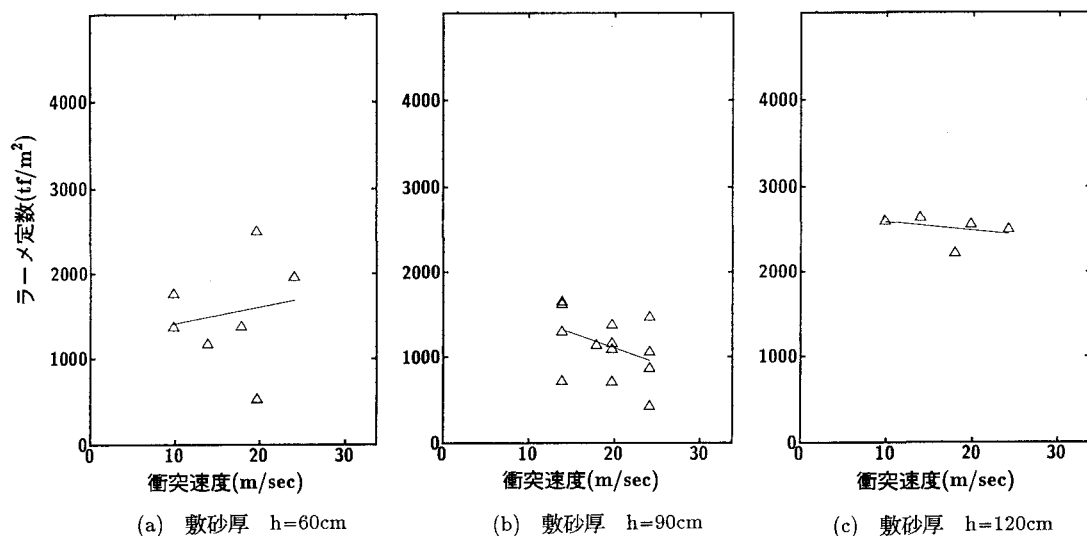


図-6 衝突速度とラーメ定数との関係 (重錘重量 $W=3\text{tf}$)

いずれの重錘重量でも設定敷厚を伝播距離と仮定して伝播速度を求めた場合はほとんどが 100m/sec 以上となる。その時のラーメ定数は $3500\sim 13000\text{tf/m}^2$ に相当する。これらの値は、広範囲かつかなり大きな値であり、実務に用いるには適当でないものと判断される。

表-3に示した結果より、重錘重量が 2tf および 3tf で、敷砂厚 $60\sim 120\text{cm}$ における重錘貫入量を考慮する場合のラーメ定数は、衝突速度に対して示すと図-5、6(a)～(c)のようになる。各直線は、ラーメ定数が衝突速度に対し線形関係にあると仮定して得られた回帰直線である。

図-5(a)のラーメ定数は、 $W=2\text{tf}$ で $h=60\text{cm}$ の場合では衝突速度が 9.9m/sec で 1520tf/m^2 、 24.2m/sec で 580tf/m^2 となり、衝突速度が増大すると直線的に減少する傾向を示している。(b)図は、 $h=90\text{cm}$ の場合であり 9.9m/sec で 3150tf/m^2 、 24.2m/sec で 1610tf/m^2 となり、(a)図と同様に衝突速度が増大すると減少する傾向を示している。しかし、 $h=120\text{cm}$ では、かなり大きなばらつきを示しているが、回帰直線で表すと衝突速度に対してほぼ一定である。重錘重量が 2tf の場合は、重錘が軽いことと敷砂が厚いために重錘のリバウンドが大きくなるものと考えられることから、最終貫入量と最大貫入量とは必ずしも一致していないためにこのような結果になった。

図-6(a)は、 $W=3\text{tf}$ 、 $h=60\text{cm}$ の場合のラーメ定数を示しているが、図-5(c)と同様にばらつきが大きい、回帰直線で表すとほぼ一定な 1000tf/m^2 程度になることがわかる。(b)図は、 $h=90\text{cm}$ の場合であるが、(a)図と同様にばらつきが大きい、回帰直線で表すとほぼ一定な 1000tf/m^2 程度になることがわかる。一方、(c)図の $h=120\text{cm}$ では、ばらつきは小さいがほぼ 2500tf/m^2 となっておりかなり大きな値となっている。この場合も、前述の場合と同様に敷砂が厚くなると重錘のリバウンドによって最終貫入量と最大貫入量とは必ずしも一致していないことが原因ではないかと考えられる。

4. あとがき

本実験は、落石覆工に作用する衝撃力を合理的に評価することを目的として、コンクリート基礎上に 4m 四方の敷砂緩衝工を設置し大型野外実験を試みた。実験では、 $W=2\text{tf}$ と $W=3\text{tf}$ の重錘 (直径 1m 、高さ 17.5cm の球底) を用い、落下高さを最大 30m から自由落下させ、重錘加速度および底部伝達応力を測定している。本論文では、これらの立ち上がり時間差から砂層の波動伝播速度を求め、この伝播速度を用いて砂層厚から重錘貫入量を考慮した場合のラーメ定数の評価検討を試みた。本実験の範囲で得られた結果をまとめると

- 1) 重錘加速度と伝達応力の主波動は、波動の立ち上がりに時間差が見られるが、両者の波形はほぼ同様な形状となっている。
- 2) 最大伝達衝撃力は最大重錘衝撃力に比べて 1.6倍以上大きい値を示しており、このことは、重錘落下部の敷砂が一次元波動状態によく似た現象となっている。
- 3) 重錘重量 $W=3\text{tf}$ で敷砂厚 $h=60、90\text{cm}$ の場合には、それぞれのラメ定数は衝突速度にほぼ一定な 1000tf/m^2 と評価できるが、敷砂厚 $h=120\text{cm}$ ではこれらの 2 倍以上の約 2500tf/m^2 となっている。一方、重錘重量 $W=2\text{tf}$ で敷砂厚 $h=60、90、120\text{cm}$ の場合にはある特定の傾向を示さなかった。

以上のことより、ラメ定数を 1000tf/m^2 として振動便覧式に代入して衝撃力を求めると文献 5) に示されているように実験結果の伝達衝撃力に比較的良く一致している。しかし、敷砂が厚い場合と重錘重量が軽い場合は実験結果も少なく、明確な傾向がみられなかった。この種の問題で厳密にラメ定数を推定することはかなり困難であると思われるが、本論のように弾性波動論的にラメ定数を推定する方法も 1 つの方法として評価できるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 新しい落石覆いの開発に関する研究、鋼材倶楽部、研究報告書、1973年 4月。
- 2) 吉田 博、石塚賢吉、細川 豊：落石によるロック・シェッド上の落石による衝撃力の推定法に関する研究、道路、No.444、pp.38 ~ 43、1978年 2月。
- 3) 吉田 博、榊谷 浩、鈴木哲治：敷砂上の落石による衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究、土木学会論文集、第352号、pp.61 ~ 70、1984年 12月。
- 4) 吉田 博、榊谷 浩、岡 衛：落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について、土木学会論文集、第362号、pp.461 ~ 470、1985年 10月。
- 5) 岸徳光、中野修、松岡健一、西 弘明：野外実験による敷砂の緩衝性能、構造工学論文集、Vol.39A、1993年 3月（掲載予定）。
- 6) 中野修、松岡健一、岸徳光、金子 学、尾山靖史：敷砂を緩衝材とした場合の重錘加速度と底部伝達力、土木学会北海道支部論文報告集、第47号、1992年 2月。
- 7) 尾山靖史、中野修、岸徳光、松岡健一：緩衝材として敷砂を用いた場合の場合の重錘衝撃力と底部伝達衝撃力の関係、第47回土木学会年次学術講演概要集第1部、1992年 9月。